

大変形を考慮した植生境界層流の不安定化と穂波の発生機構に関する数値シミュレーション

Numerical Simulation on the Instability of Canopy Layer Flow and 'Honami' Generation Mechanism Considering A Large Deflection of Flexible Plant

日野 幹雄¹

Mikio Hino, Chuo University

¹ 正会員 工博 中央大学・総合政策学部 (〒192 東京都八王子市東中野 742)

Honami is a well-known phenomenon observed in paddy and wheat fields. However, the mechanism of Honami generation is not completely solved. Several theories published hitherto are divided into (i) gust attack theory, (ii) resonant oscillation theory induced by turbulence of air flow, and (iii) a recently proposed one — the instability wave theory generated between air and canopy flows.

In order to shed a light into the phenomenon, a numerical simulation considering large deflection of plant stalk has been performed. Turbulent air and canopy flow is computed by LES model by Kanda and Hino (1994). The waving oscillation of plant stalk is simulated by a row of elastic cylinders

Within a limited range of this simulation condition, the result seems to support the gust-attack theory, although the conclusion does not exclude the possibility of other mechanisms.

1. 序論

1950年代の電子式デジタル・コンピュータの誕生以来, 流体现象の数値シミュレーションは驚くほどの進歩をした. 流体数値シミュレーション (CFD) は, 「実際の流体実験の替わりはできない」という評価はほぼ完全に覆されたし, 「CFDでは新しい現象の発見はできない (であろう)」というコンピュータ否定論も退けられたとあって良いであろう.

一方, 構造力学の分野では FEM (有限要素法) が素晴らしい発達をみせ, この手法は流体力学分野でも活用されている.

(a) 流体-構造系の相互干渉のシミュレーション : これまでは, 流体系の計算と構造系の計算は, ほとんど独立・無干渉に進歩してきたが, ここ10年ほど前から例えば, 「カルマン渦の発生による物体の振動と揚力変化」そして「物体の振動によるカルマン渦発生現象の変化」というような, 流体系と構造系の相互干渉を取り扱う研究がみられるようになった.

しかし, こうした研究は局所的流れ場の問題であ

って, より大きなスケールでの相互干渉の問題ではなかった. 弾性体の変形が流れ場のより大きなスケールの構造を如何に変え, さらにまた流れ場の構造変化が構造系の振動を如何に変えるかという問題は, これまでほとんど取り扱われてこなかった. 本論文で論じる「稲穂」の問題はこうした観点からの研究の一つである.

(b) 本研究の目的と方法

ホナミの研究は, その現象の複雑さ, 対象の特殊性 (実験室の風洞では完全な再現の困難な大気乱流中の現象であること, 稲穂を弾性棒で模擬することによる極端な単純化)などを考えれば, 現場における実測が最も望ましいと言える. しかし, 実測には種々の計測機を用意しなければならず, 大勢の人手・場所などいろいろの困難を伴うこと, せっかく準備しても都合良くホナミがみられるとは限らないなどのことを考えると, 単純化により現象を歪めてしまう可能性もないわけではないが, 数値実験を行うのも意義のあることであろう. 特に, もし記録を厭わなければ場全体のあらゆる時空データが完全に記

録保存しうるという利点がある。

本論文では、これまでに発表した LES 乱流モデルにより大気および植生層内の流れをシミュレートし、直立弾性棒群で模擬した稲葉が、植生層内の各点における風速による力を受けて変形し変動する様子を、時々刻々計算する。模擬稲穂の変形により大気-植生層の境界位置 (canopy height) は刻々変化し、また稲の変形の位相差から植生層内の葉面積密度 (LAD = leaf area density) が変化し、これらの変化が植生層の境界変化、粗度変化として大気流場に乱流特性・構造の変化として跳ね返る。大気乱流場の構造変化は再び模擬稲穂の変化に作用する。

2. 穂波の発生機構に関する理論

ホナミは「穂波」という言葉が示すように日本人には古くから知られている現象であるが、この発生に関する研究論文は必ずしも多くはなく、従って、ホナミの発生機構は十分に解明されたとは言えない。

これまでに提出されたホナミの発生に関する理論は、次の3つに分類しうるであろう。

(i) **大気乱流の大規模渦による強制振動** : ホナミの発生についての最初の論文は井上 (1955) により提出され、この中で彼は、ホナミ現象は稲穂による「乱子」の検知 (検出) であると指摘した。井上のいう「乱子」は今日の専門用語で言い換えれば、大規模渦とか秩序構造とって良いであろう。正確に言えば、井上の「乱子」とは大規模渦のみではなく、様々なスケールの渦の集合を意味するのであるが、

穂波の発生に関するこの第一の説は、気象学の言葉で言えば、'gust attack' theory (突風説) とも言える。ガストの進行とともに、稲穂の大きな撓みが進行し、ガストの通過後は稲穂はガストの進行方向に位相差をもつ自由振動をし、これが稲穂の撓みの波となるという考えである (Finnigan 1979)。

(ii) **大気乱流との共鳴振動** : 稲の葉・穂は弾性棒の集合と考えることができ、したがってある固有振動周期をもつ。大気乱流は様々な周期をもつ変動の集合であるから、稲の固有振動周期に対応する大気乱流のスペクトルが十分大きなエネルギーをもつとき、稲穂と大気乱流との共鳴振動として一種の buffeting 振動が生じる。これがホナミに他ならないと云う考え方である (井上1955, Maitani 1979)。

(iii) **大気-植生せん断流の変曲点不安定** :

平均流が変曲点をもつことが、流れ不安定の条件

であることは、Rayleigh (1880) によって創められた「流れの微小振幅安定理論」から導かれた結論である。この現象は剪断層不安定として良く知られている現象である。大気流と植生との間の canopy flow も井上 (1963) の研究によって示されたように、まさに変曲点をもつ剪断流であり、従ってそこに渦列が発生することは当然考えられて良い。しかし、これを穂波の発生機構として捉えたのは、池田 (1991) が最初である。その後、Raupach (1996) も植生層流と剪断流との類似を指摘している。

(iv) 穂波の周期

穂波の周期と風の場合との関係については、①穂波の振動周期が穂波の固有周期とほぼ同じ場合と

② 穂波の振動変位スペクトルが風速の変動スペクトルと相関を示す場合が報告されている (Maitani 1979)。このことについては、井上 (1955) はすでに「乱子の通過時間が稲穂の固有周期より短い場合は、風速に関係なく固有振動型 (線スペクトル型) であり、乱子の通過時間が稲穂の固有周期より長い場合は帯状スペクトル型である」と予測している。

3. 数値シミュレーション・実験

神田・日野 (1993) は、植生層流れの LES 数値シミュレーションにより、大規模渦の発生を確認した。池田ら (1997) は、葦原での実測を行い、発生理論との比較・実証を行った。さらに、池田ら (1998) は線型撓み式と組み合わされた数値シミュレーションを行っている。

吉田・魚地 (1993) は有限要素法により構造物の大変形を取り扱っており、野村・新明 (1993) は流れによる膜の撓みの数値シミュレーションを行っている。

4. 理論

(a) 大気・植生層の流れおよび乱流モデル

大気流・植生層内の流れに関しては、これまでの計算法を踏襲する。大気流の乱流モデルには Smagorinsky - Schumann 型の LES モデルを用いる。植生層流の乱流モデルには、LES 型の神田・日野モデルを用いる。

(b) 植生のモデル-可撓性弾性柱列の大変形を考慮する場合

可撓性植生としての稲葉茎は直立弾性棒群により模擬する。無風時の直立植生の方向を z 軸、地表風下方向を x 軸とする。

ホナミと呼ばれる現象では、一本一本の可撓性植生は大きく撓って揺れ動く。一本一本の稲の葉茎は

互いに接触することなく独立に変形するとする。微小変形の場合には変形を表す座標系は不変としてよいが、大変形の場合には植生の変形を記述する局所座標系は刻々変化する。稲を模擬する弾性棒の変形は、変形を考える微小区間の稲の軸に対する接線方向 (z_s) とこれに直交する方向 (x_s) に関する局所座標に関して次式で表す。(x , z 等の記号は、風速場の計算との整合性の関係で慣例とは異なる。)

(i) 大変形の振動方程式

x_s 方向の変位:

$$EI \frac{\partial^4 x_s}{\partial s^4} + C_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 x_s}{\partial s^2} \right) + m \frac{\partial^2 x_s}{\partial t^2} - f_x(x_s, z_s, t) = 0 \quad (1)$$

z_s 方向の変位:

$$EA \frac{\partial z_s}{\partial s} + m \frac{\partial^2 z_s}{\partial t^2} - f_z(x_s, z_s, t) = 0 \quad (2)$$

ここに、 E : ヤング率、 I : 断面二次モーメント、 A : 断面積、 V : 単一長さ当たりの体積、 C_m : 仮想質量係数、 C_0 : 構造的減衰係数、 f : 外力項 (流体および重力、仮想質量力)。

外力項:

$$f_{zs}(x_s, z_s, t) = F_{zs} + (\rho - \rho_s) V g \cos \alpha + \rho_s (1 + C_m) V \frac{\partial v_1}{\partial t} \quad (3)$$

軸方向に対しては、軸力による伸縮を考えれば(2)が成立するが、実際問題として軸方向の伸縮は無視しても良いので、考えている点とすぐ隣の点との距離が一定であるとする。

すなわち、 z_s 方向の変位は式 (2) を直接解くのではなく、

$$\frac{\partial z_s}{\partial s} = 0 \quad (4)$$

すなわち、稲茎の各セグメント長 $\overline{PP}$ が一定

$$\overline{P_{Ih, Kh-1} P_{Ih, Kh}} = \text{一定} \quad (5)$$

の関係を用了。

境界条件 : 弾性棒の撓げ振動の境界条件は

$$\text{固定端 } (s = 0) : x_s = 0, \quad \frac{\partial x_s}{\partial s} = 0 \quad (6)$$

$$\text{自由端 } (s = 1) : \frac{\partial^2 x_s}{\partial s^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 x_s}{\partial s^3} = 0 \quad (7)$$

したがって、

(ii) 絶対座標 (x_h, z_h) から局所座標 (x_s, z_s) への変換

模擬稲穂上の点 (x_{h0}, z_{h0}) [節点番号 (Ih, Kh)] における稲穂の傾き (dx_h/dz_h) から、局所座標 (x_s, z_s) への変換は次式によって行われる。この関係は、接線ベクトル $(1, dx_h/dz_h) / \sqrt{1 + (dx_h/dz_h)^2}$ と絶対座標系の任意ベクトル (x_h, z_h) の内積および接線ベクトルに直交する単位ベクトルと任意ベクトルの内積として次式のように求められる。

$$x_s = [- (z_h - z_{h0}) (dx_h/dz_h)_{Ih} + (x_h - x_{h0})] / \sqrt{1 + (dx_h/dz_h)_{Ih}^2} \quad (8)$$

$$z_s = [(z_h - z_{h0}) + (x_h - x_{h0}) (dx_h/dz_h)_{Ih}] / \sqrt{1 + (dx_h/dz_h)_{Ih}^2} \quad (9)$$

(iii) 局所座標 (x_s, z_s) から絶対座標系 (x_h, z_h) への変換 : 局所座標 (x_s, z_s) において、時間ステップ n の状態 ($x_s(Ih, Kh, 0), z_s(Ih, Kh, 0)$) から式 (1), (2) により次の時間ステップ ($n+1$) の状態 ($x_s(Ih, Kh, 1), z_s(Ih, Kh, 1)$) が求められると、この局所座標値を直ちに絶対座標値に変換しなければならない。というのは、微小変形の場合とは異なり、この局所座標系は模擬稲穂の次の軸上点 ($Ih, Kh+1$) の変形を求める際には保存されないから。

$$x_h = x_{h0} + (z_s - x_s (dx/dz)_{Ih}) / \sqrt{1 + (dx/dz)_{Ih}^2} \quad (10)$$

$$z_h = z_{h0} + (z_s (dx/dz)_{Ih} + x_s) / \sqrt{1 + (dx/dz)_{Ih}^2} \quad (11)$$

(3) 撓んだ柱体に働く力

斜めの柱体に働く力 (軸方向単位長さ当たりの) は、軸に直角方向の流速成分の二乗に比例し、その方向も軸と直角方向である。ここに、柱体と x 軸のなす角を α として、軸に直角方向 (x_s) の流体力は

$$F_{zs} = \frac{\rho C_D}{2} \left| U \sin \alpha - W \cos \alpha - \frac{\partial x_s}{\partial t} \right| \cdot (U \sin \alpha - W \cos \alpha - \frac{\partial x_s}{\partial t}) \quad (12)$$

検証 : 柱体の変位がない ($\partial x_s / \partial t = 0$) 場合に、この力の x , y 成分、すなわち抵抗と揚力はそれぞれ式(12)により

$$F_x = \frac{\rho C_p}{2} |U \sin \alpha - W \cos \alpha| \cdot (U \sin \alpha - W \cos \alpha) \sin \alpha \quad (13)$$

$$F_y = -\frac{\rho C_p}{2} |U \sin \alpha - W \cos \alpha| \cdot (U \sin \alpha - W \cos \alpha) \cos \alpha \quad (14)$$

ここで、もし $V = 0$, つまり、流れの方向が x 軸方向であるとする、上式は

$$F_x = \frac{\rho C_p}{2} U^2 \sin^3 \alpha \quad (15)$$

$$F_y = -\frac{\rho C_p}{2} U^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha \quad (16)$$

となる。係数の式で表すと

$$C_D' = C_D \sin^3 \alpha \quad (17)$$

$$C_L' = C_D \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha \quad (18)$$

日本機械学会便覧¹⁰⁾によれば、(出典 Hoerner)

$$C_D' = 1.1 \sin^3 \alpha + 0.02 \quad (19)$$

$$C_L' = 1.1 \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha \quad (20)$$

である。

したがって、式 (2)の考え方は正しいと考えて良い。

(4) 葉面積密度の変化

本研究では、可撓性植生群と風の場合との相互作用は、弾性棒でシミュレートした稲葉茎と風との直接の作用としてではなく、稲葉の揺動による葉面積密度 LAD の変化として取り扱われる。すなわち、植生の密生度は計算格子間隔よりも細かく採っており、模擬植生一本一本の変形の結果が、風場計算の各微小計算要素 (dx, dz) 内に占める植生葉面積密度分布の変化となり、これが大気の流れへの抵抗変化となる。

なお、植生要素の作る後流の直接的な影響は、計算には考慮されていない。この計算をするためには、大気流の計算メッシュは本計算とは逆に、植生要素の表現よりさらに細かく採らなければならず、この計算を無数の稲葉茎について行うとコンピューターの記憶容量や計算時間の関係から、風の場合全体の計算は不可能となるからである。

稲の大変形を考慮する場合には、計算上稲の葉と

稲の葉同士が交わる場合も生じるであろうが、本計算の場合には稲の葉同士は力学的には干渉としない。

LAD 計算のアルゴリズム : 稲の大変形による葉面積密度の変化は、大気流計算の一つのメッシュ内でいく本かの稲葉の部分セグメントの占有長さの和を求めると良い。

本プログラムでは2つのアルゴリズムを考えたが、これらの詳細は本論文(本講演会)の主旨とは離れるので他で紹介する。

5. 計算方法

(a) 差分式および計算条件

稲葉茎の撓みの基礎方程式は、 s 方向には通常の中央差分、時間に関しては前進差分で表した。流れ場の差分メッシュ格子は $\Delta x = 0.2\text{m}$, $\Delta y = 0.1\text{m}$, $\Delta z = 0.1\text{m}$ の等間隔格子、格子数は $124 \times 6 \times 42$ 、従って $24.8\text{m} \times 0.6\text{m} \times 4\text{m}$ の領域について計算を行った。また、 x 方向および y 方向は周期境界条件を適用し、地表面は風速 0、剪断応力 $\tau = -\rho u w = l^2 \partial u / \partial z$ (時間および水平面内では変化) z 方向の上面境界は自由滑りとした。

稲葉茎については、稲の高さ 1m 、各セグメント(格子点間隔) 0.1m 、点数 $kh_{\max} = 22$, $\Delta s = 0.05\text{m}$ である。

時間ステップ : 風の場合の計算の時間ステップ Δt は、計算の進行とともに自動的に計算の安定条件を満たすように変更される。撓み計算の時間ステップもこれに連動して細くなる。また撓み計算からの要請(撓みの時間変化、撓み角)からも Δt が自動的に細くなるようにした。

(b) 計算経過

計算は初期状態 $t = 0$ において、風速 0、一定圧力勾配の下に最初 $\Delta t = 0.01\text{sec}$ 以下自動的に細くなるので、稲葉は撓みによる変形を起こさない条件で 70,000 ステップまで計算をすすめて、定常状態に達したことを確かめた。この時点で Δt は 0.002sec まで細くなる。このステップで場の最大風速は 3.8m/s に達したが、流れは層流状態で計算スキームが極めて安定であることが確認された。

次に、70,001 時間ステップで一度だけ風速場に乱数撓乱を与え、同時に稲葉に風による撓み運動を許した。これ以後流れは徐々に乱流状態に移行した。また、稲葉群も風により撓み運動を始めた。

(c) 計算上の困難点

風の場合の計算は上にも述べ

たように極めて安定で問題点はないが、撓み計算は U(m/s) メッシュ分割が粗い（稲高 1m, $\Delta s = 0.05\text{m}$ ）ため、大変形域では注意が必要である。しかし、これは計算スキーム上の問題ではなく、変形の増加とともに、粗い分割では4階微分表示が不正確となるためでありメッシュを細かくすることにより避けられる。

6. シミュレーション結果の解析

風速場の乱れの発生・成長と穂波振動について、次の3つの過程が明らかになった。

(i) **高周波の擾乱の発生と乱れ**：1回の乱れの種蒔きの後、まず植生境界層の上縁付近に周期性の強い高周波擾乱が発生し成長し始める。しかし、この擾乱はそのまま乱流化するのではなく、一度減衰したのちに再び増幅し乱流へと遷移する。この擾乱が植生境界層に及ぶことはない（図-1）。

(ii) **植生層内の擾乱の発生**：その後、この擾乱より周期のやや長い速度変動が植生層内に発生する。発生周期は $T=2\text{sec}$ 位で、Ho and Huerre (1984)

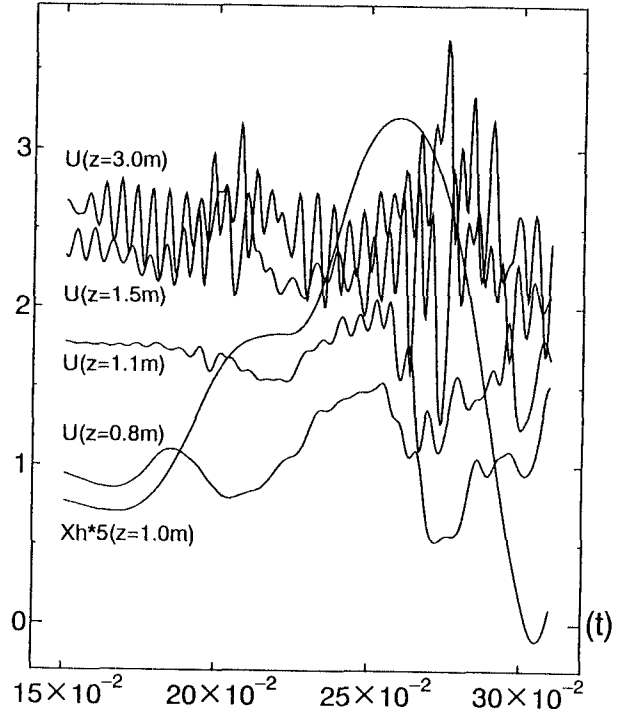


図-2 : $z = 3, 1.5, 1.1\text{ m}$ における風速変動と稲穂の先端の変動。

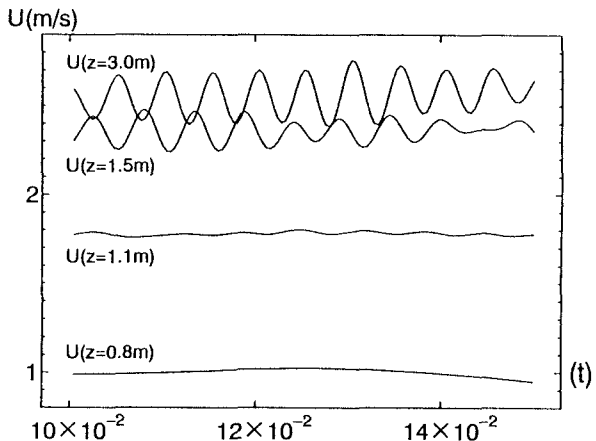
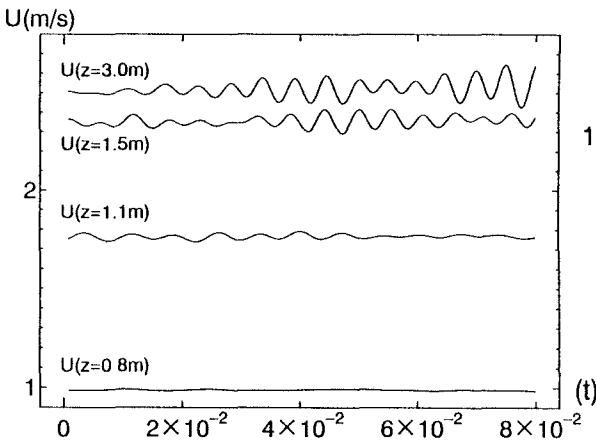


図-1 : 高周波の規則的擾乱の発生・発達。一時減衰後再発達・乱流化。

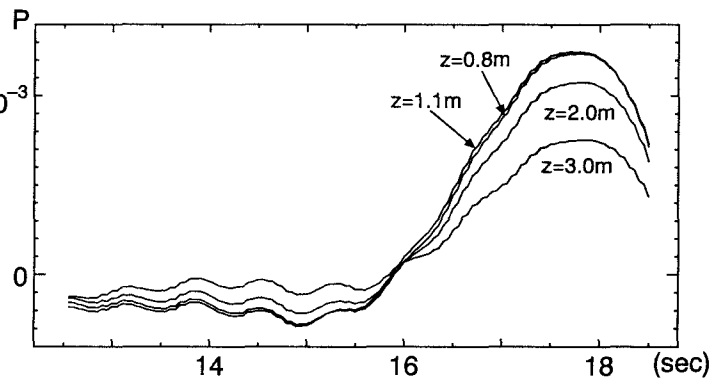


図-3 : 圧力変化

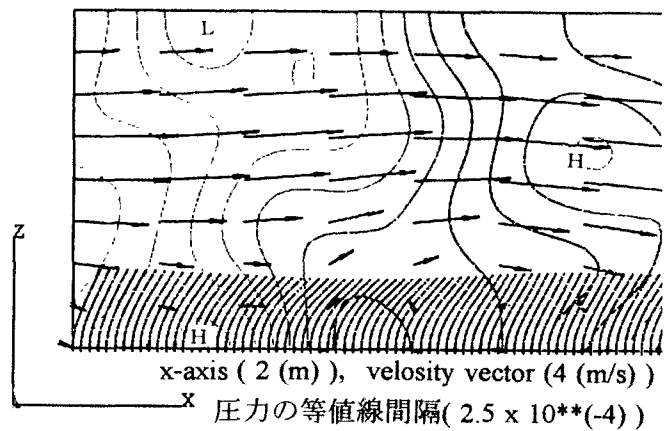


図-4 : 圧力分布の等値線と流速ベクトル

の式 ($f \theta / U_s = 0.032$, $f = 1/T$, θ : 運動量厚, U_s : 植生境界層の平均風速) からの推定値とほぼ一致する。発生位置や周期からこの流速変動は剪断流の変曲点不安定によると考えられる。しかし、この風速変動の振幅は小さく、稲穂に振動を生じさせるには不十分である。

(iii) 植生境界層内におけるより低周波の強い乱れの発生 : やがて、植生境界層内に、(ii)の流速変動に重畳して、より周期の長い振幅の十分大きな流速変動が不規則に発生し、これにより稲穂の振動が生じる (図-2)。この植生境界層内の第2の擾乱は、高さ $z=3, 1.5, 1.1\text{m}$ における圧力変動と対応しており (図-3)、高い圧力分布は乱れの sweep 運動によって (図-4) この圧力変動は植生境界層外 ($z=3\text{m}$) の高周波の乱れを除いた風速変動に対応しているようにみえるが、今後 詳細な解析に俟たなければならない。

7. 結論

植生層内の擾乱の発生発達には、上述の(i)(ii)(iii)の3段階がある。穂波の発生は、第3過程の植生境界層内の振幅の大きいやや周期の長い不規則な流速変動によって引き起こされる。この流速変動は、全流れ場の圧力変動に対応している。この擾乱の発生のメカニズムは、風の流れ場の乱れ sweep 運動と関連しているようにみえるが、詳細な解析は今後の課題として残された。

上の結論は、一見 gust attack theory を支持するようにみえるが、一種類の数値シミュレーションの結果によるもので、井上 (1955) がすでに指摘しているように、「乱子の卓越周期と稲穂の固有周期」の相互関係により、風に対する稲穂の応答は異なるのであり、他の説を排除するものではない。

今後、穂の条件の組み合わせについてシミュレーションを続ける必要がある。また、本計算は、コンピュータのメモリや計算時間の制約から、 y 方向のメッシュ数が少ない準 2.5D 計算であるので、 y 方向にメッシュ数を増やした計算も必要である。

謝辞 : 本研究は、科研費・基礎研究(C)(2)「植生の大変形弾性振動を考慮した穂波発生のメカニズムと物質・エネルギー・交換過程の研究」の補助を受けて行われた。また、計算結果の可視化・図化 (図-4の作成) には、Clef 3D ((株) 計算流体研究所) を使用した。ともに、厚く謝意を表する。

参考文献

- 1) Brunet, Y., Finnigan, J. J. and Raupach, M. R. (1998): A wind tunnel study of air flow in waving wheat : single-point velocity statistics, Boundary - Layer-Meteorol., vol. 70, 95-132.
- 2) Finnigan J. J. (1979) : Turbulence in waving to wheat, I. Mean statistics and Honami, Boundary -Layer Meteorol., vol.16, 181-211.
- 3) Ho, C. M. and Huerre, P. (1984) : Perturbed free shear layers, Ann. Rev. Fluid Mech. vol.16, 365-424.
- 4) 日野幹雄 (1998) : 大変形をする穂波の数値シミュレーション, 第12回数値流体シミュレーション論文集.
- 5) 池田駿介, 山田知裕, 戸田祐嗣 (1998) : 2次元 LES を用いた可撓性を有する植生層内外の乱流構造と穂波現象に関する研究, 土木学会論文集, (投稿中).
- 6) 井上栄一 (1955) : 穂波の研究, 1 穂波の機構と特性, 農業気象, 第11巻1号, 18-22.
- 7) Inoue, E. (1963) : On the turbulent structure of air flow within crop canopies, J. Met. Soc. Jpn., vol.41, 371-326.
- 8) Kanda, M. and Hino, M. (1994) : Organized structures in developing turbulent flow within and above a plant canopy, using large eddy simulation, Boundary-layer Meteorol, vol. 68, 237-257.
- 9) Maitani, T. (1979) : An observational study of wind-induced waving of plants, Boundary-Layer Meteorol., vol.16, 49-65.
- 10) 日本機気学会便覧 : A5, p.106(出典, Hoerner).
- 11) 野村卓史・新明政人 (1998) : ALE 有限要素法による薄膜と流れとの連成解析, 土木学会・応用力学論文集, vol.1, 241-251.
- 12) Raupach, M. R., Finnigan, J. J. and Brunet, Y. (1996) : Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies : The mixing-layer analogy, Boundary -Layer Meteorology, vol.78, 351-382.
- 13) 辻本哲郎, 北村忠紀, 中川博次 (1995) : 植生層構造の不安定現象としての穂波の形成機構, 水工学論文集, 第39巻, 519-524.
- 14) 吉田裕, 魚地征一郎 (1993) : 非線形動解析における直接時間積分の安定性向上に関する検討, 構造工学における数値解析シミュレーション論文集, 第17巻, 525-530.

(1998. 9. 30受付)